

ПОДБОР ВЕНТИЛЯТОРОВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ИХ РАБОТЕ НА РАЗНЫХ СТВОЛАХ

А. Ф. КАРАТАЕВ

(Представлено научной конференцией горно-эксплуатационного факультета).

Разработка наиболее простого и наглядного способа подбора вентиляторов для сложной вентиляционной сети шахты и анализа работы их имеет большое практическое и теоретическое значение.

Исключительное значение этот вопрос приобретает в условиях Кузбасса, при все более широком внедрении фланговой схемы вентиляции шахт, которая во всех случаях, кроме применения нагнетательного способа проветривания, приводит к совместной параллельной работе нескольких вентиляторов на разных стволах.

Несмотря на наличие теоретической разработки вопроса о параллельной работе вентиляторов [1; 2], до настоящего времени отсутствует простой способ подбора и анализа работы параллельно включенных вентиляторов. Исследование параллельной работы нескольких вентиляторов и их подбор аналитическим способом представляет сложную задачу [1,1].

Графический способ исследования вентиляторов при параллельной их работе [3,335], является несложным, если параллельно работает не более двух вентиляторов.

К. С. Борисенко [4,25] рекомендует при подборе вентиляторов строить характеристики сложных вентиляционных ветвей схемы вентиляции шахты и характеристики вентиляторов. Точка пересечения этих характеристик определит требуемый вентиляционный режим работы вентилятора. Построение же характеристик сложных вентиляционных ветвей является очень сложным и трудоемким процессом.

В данной работе поставлена задача на основании исследования характеристик сложных вентиляционных ветвей шахт и характеристик вентиляторов разработать наиболее простой графический способ подбора вентиляторов при параллельной их работе на разных стволах.

Исследование уравнений характеристик сложных вентиляционных ветвей

В практике вентиляции шахт возможны два вида уравнений характеристик вентиляционных ветвей:

$$y = Ax^2, \quad (1)$$

$$y = Ax^2 + Bx + C. \quad (2)$$

Характеристика вентиляционной ветви, имеющая уравнение вида (1), проходит через начало координат и пересекает характеристику вентилятора, независимо от вида характеристики вентилятора, в одной точке **A** (рис. 1). Если точка **A** находится на рабочей части характеристики вентилятора, то

это одновременно указывает на обеспечение высокого к.п.д. вентиляторной установки, а также и на устойчивость вентиляционного режима шахты. Данное положение действительно только при одиночной или при последовательной работе вентиляторов (нагнетательно-всасывающий способ вентиляции).

При параллельной работе вентиляторов на разных стволах характеристики вентиляционных ветвей строятся по уравнению (2). Это уравнение показывает, что в данном случае характеристики вентиляционных ветвей не проходят через начало координат, а пересекают ось ординат на некотором расстоянии A' (рис. 1). Точка (A') пересечения характеристики вентиляционной ветви с осью ординат определяется величиной свободного члена C в уравнении (2). При $x=0$ уравнение (2) примет вид $y=C$.

Следовательно, в зависимости от вида характеристики вентиляционной ветви и величины свободного члена C , а также вида характеристики вентиляторов, при параллельной работе их, возможно пересечение характеристики вентиляционной ветви с характеристикой вентилятора в нескольких точках (рис. 1), что указывает на возможность возникновения неустойчивого режима вентиляции шахты.

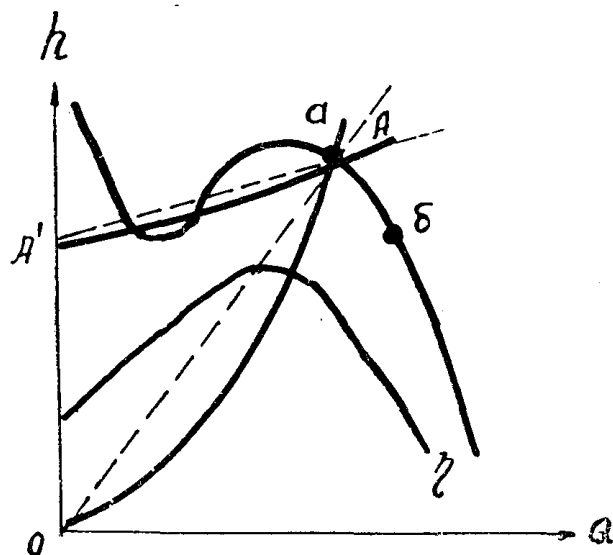


Рис. 1. Характеристика осевого вентилятора.

Для вывода формулы определения величины свободного члена C в уравнении характеристики сложной вентиляционной ветви производим исследование двух принципиальных схем вентиляции шахт и расстановки вентиляторов (рис. 2 и 3), к которым могут быть сведены любые расчетные схемы вентиляции шахт и расстановки вентиляторов.

При первой схеме (рис. 2), согласно указанным направлениям движения воздуха, для вентиляционной ветви $A-D$ имеем:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4 = Q_1 + x_1, \quad (3)$$

$$\text{где } x_1 = Q_2 + Q_3 - Q_4.$$

Разность давлений между точками $A-D$

$$\begin{aligned} h_{A-D} &= h_0 + h_1 = R_0 Q_0^2 + R_1 Q_1^2 = \\ &= R_0 (Q_1 + x_1)^2 + R_1 Q_1^2 = R_0 Q_1^2 + 2R_0 Q_1 x_1 + R_0 x_1^2 + R_1 Q_1^2 \text{ или} \\ h_{A-D} &= (R_0 + R_1) Q_1^2 + 2R_0 Q_1 x_1 + R_0 x_1^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Выражение (4) есть уравнение характеристики вентиляционной ветви $A-D$ (рис. 2). Приняв Q_1 за переменную величину, а все остальные члены за постоянные величины, получим уравнение параболы вида $y = Ax^2 + Bx + C$, где $C_{A-D} = R_0 x_1^2$, или на основании равенства (3)

$$C_{A-D} = R_0 (Q_0 - Q_1)^2. \quad (5)$$

Для вентиляционной ветви $A-E$ (рис. 2) имеем:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4 = Q_2 + x_2, \quad (6)$$

$$\text{где } x_2 = Q_1 + Q_3 - Q_4;$$

$$Q_{01} = Q_2 + Q_3 - Q_4 = Q_2 + x_3, \quad (7)$$

$$\text{где } x_3 = Q_3 - Q_4,$$

$$Q_{02} = Q_2 + Q_3. \quad (8)$$

Разность давлений между точками А—Е

$$\begin{aligned} h_{A-E} &= h_0 + h_{01} + h_{02} + h_2 = R_0 Q_0^2 + R_{01} Q_{01}^2 + R_{02} Q_{02}^2 + R_2 Q_2^2 = \\ &= R_0 (Q_2 + x_2)^2 + R_{01} (Q_2 + x_2)^2 + R_{02} (Q_2 + Q_3)^2 + R_2 Q_2^2 \text{ или} \\ h_{A-E} &= (R_0 + R_{01} + R_{02} + R_2) Q_2^2 + (2R_0 x_2 + 2R_{01} x_3 + 2R_{02} Q_3) Q_2 + \\ &+ R_0 x_2^2 + R_{01} x_2^2 + R_{02} Q_3^2. \end{aligned} \quad (9)$$

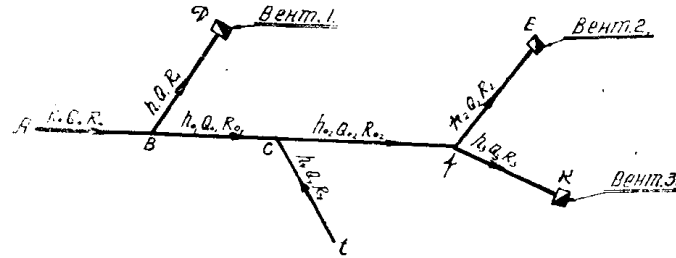


Рис. 2. Принципиальная схема вентиляции шахты и расстановки вентиляторов.

Выражение (9) также есть уравнение характеристики вентиляционной ветви А—Е (рис. 2). Приняв Q_2 за переменную величину, а все остальные члены за постоянные величины, получим уравнение параболы вида $y = Ax^2 + Bx + C$, где $C_{A-E} = R_0 x_2^2 + R_{01} x_2^2 + R_{02} Q_3^2$ или на основании равенства (6), (7), (8)

$$C_{A-E} = R_0 (Q_0 - Q_2)^2 + R_{01} (Q_{01} - Q_2)^2 + R_{02} (Q_{02} - Q_2)^2. \quad (10)$$

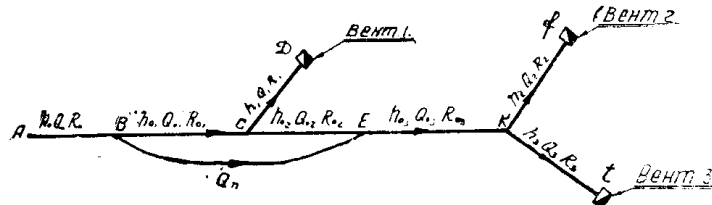


Рис. 3. Принципиальная схема вентиляции шахты и расстановки вентиляторов.

Формула свободного члена уравнения вентиляционной ветви А—К (рис. 2) аналогична формуле (10), но в ней вместо Q_2 стоит Q_3 , т. е.

$$C_{A-K} = R_0 (Q_0 - Q_3)^2 + R_{01} (Q_{01} - Q_3)^2 + R_{02} (Q_{02} - Q_3)^2. \quad (11)$$

При второй схеме (рис. 3) согласно указанным направлениям движения воздуха для вентиляционной ветви А—f имеем:

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3. \quad (12)$$

$$Q_{01} = Q_2 + x_5. \quad (13)$$

$$\text{Согласно (рис. 3) } x_5 = Q_1 + Q_3 - Q_n,$$

$$Q_{02} = Q_2 + x_6. \quad (14)$$

Согласно (рис. 3) $x_6 = Q_2 - Q_n$,

$$Q_{03} = Q_2 + Q_3, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} h_{A-f} = & h_0 + h_{01} + h_{02} + h_{03} + h_2 = R_0 Q_0^2 + R_{01} Q_{01}^2 + \\ & + R_{02} Q_{02}^2 + R_{03} Q_{03}^2 + R_2 Q_2^2 = R_0 (Q_1 + Q_2 + Q_3)^2 + \\ & + R_{01} (Q_2 + x_5)^2 + R_{02} (Q_2 + x_6)^2 + R_{03} (Q_2 + Q_3)^2 + R_2 Q_2^2 \text{ или} \\ h_{A-f} = & (R_0 + R_{01} + R_{02} + R_{03} + R_2) Q_2^2 + (2R_0 Q_1 + 2R_0 Q_3 + 2R_0 x_5 + \\ & + 2R_{02} x_6 + 2R_{03} Q_3) Q_2 + R_0 Q_{12} + R_0 Q_3^2 + 2R_0 Q_1 Q_3 + \\ & + R_{01} x_5^2 + R_{02} x_6^2 + R_{03} Q_3^2. \end{aligned} \quad (16)$$

Выражение (16) есть уравнение характеристики вентиляционной ветви $A-f$ (рис. 3). Приняв Q_2 за переменную величину, а все остальные члены за постоянные величины, получим уравнение параболы вида

$$y = Ax^2 + Bx + C, \text{ где } C_{A-f} = R_0 (Q_1 + Q_3)^2 + R_{01} x_5^2 + \\ + R_{02} x_6^2 + R_{03} Q_3^2$$

или на основании равенств (12), (13), (14), (15)

$$C_{A-f} = R_0 (Q_0 - Q_2)^2 + R_{01} (Q_{01} - Q_2)^2 + R_{02} (Q_{02} - Q_2)^2 + R_{03} (Q_{03} - Q_2)^2. \quad (17)$$

Аналогично можно вывести формулу величины свободного члена для характеристики любой вентиляционной ветви (рис. 3).

Формулы свободного члена (5), (10), (11), (17) в уравнении парабол при различных расчетных схемах вентиляции, расстановки вентиляторов и их количества (рис. 2 и 3) позволяют утверждать, что величина свободного члена в уравнении (параболы) любой вентиляционной ветви сети шахты равна сумме произведений сопротивлений общих участков вентиляционных ветвей на квадрат разности между общим количеством воздуха, проходящего через данный общий участок вентиляционной ветви, и количеством воздуха, подаваемого вентилятором данной ветви, т. е.

$$C = R_{01} (Q_{01} - Q)^2 + R_{02} (Q_{02} - Q)^2 + \dots + R_{0n} (Q_{0n} - Q)^2, \quad (18)$$

где C — свободный член уравнения (параболы) рассматриваемой вентиляционной ветви;

R_{01}, R_{02}, R_{0n} — аэродинамическое сопротивление общих участков расчетной схемы вентиляции шахты и расстановки вентиляторов;

Q_{01}, Q_{02}, Q_{0n} — количества воздуха, проходящие по общим участкам расчетной схемы вентиляции шахты и расстановки вентиляторов;

Q — количество воздуха, подаваемое вентилятором в рассматриваемую вентиляционную ветвь.

Формула (18) позволяет сделать следующие выводы:

1. Чем больше свободный член C , тем выше будет находиться точка A' (рис. 1), и, следовательно, меньше вероятность сохранения устойчивого вентиляционного режима в ветви.

2. Чем больше сопротивление общих участков, тем более вероятно появление неустойчивого вентиляционного режима в вентиляционной ветви.

3. Чем меньше количество воздуха, подаваемого вентилятором в рассматриваемую вентиляционную ветвь по сравнению с общим количеством

воздуха, проходящим по общим участкам, тем больше будет величина свободного члена C , тем меньше вероятность сохранения устойчивого вентиляционного режима.

4. Чем больше включено вентиляторов на параллельную работу на разных стволах, тем ниже возможность сохранения устойчивого вентиляционного режима.

Исследование характеристик вентиляторов

Характеристикой вентилятора называется графически выраженная зависимость h , η от Q . Кривые $\eta - Q$ позволяют, задавшись предельным к.п.д. вентилятора, установить границы его экономичной работы. Различают три типа индивидуальных характеристик шахтных вентиляторов:

1) характеристика, имеющая максимум и минимум, которой обладают в основном осевые вентиляторы и некоторые центробежные (рис. 1);

2) характеристика, имеющая только максимум, которой обладает большая часть центробежных вентиляторов (рис. 4);

3) характеристика, не имеющая ни максимума ни минимума, которой обладают осевые вентиляторы с малым углом установки лопаток до 20° и некоторые центробежные (рис. 5) [2,52].

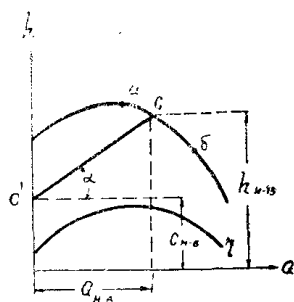


Рис. 4. Характеристика центробежного вентилятора.

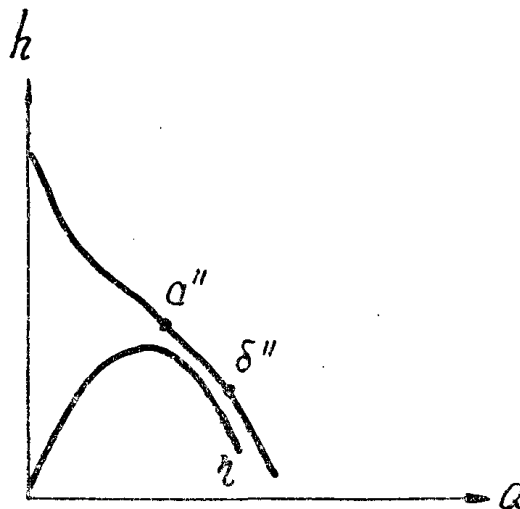


Рис. 5. Характеристика осевого вентилятора с малым углом установки лопаток.

В основу подбора любого типа вентиляторов ложатся два условия:

1) обеспечение экономичной работы вентилятора при заданных параметрах;

2) обеспечение устойчивого вентиляционного режима.

Первое условие при подборе вентиляторов достигается в том случае, если точки пересечения характеристик вентиляционных ветвей шахты с характеристиками вентиляторов находятся на рабочих частях характеристик вентиляторов, соответствующих к.п.д. вентилятора не менее 0,5 (а, б, а', б', а'', б''—рис. 1, 4, 5).

Второе условие достигается тем, что характеристика вентиляционной ветви шахты пересекает характеристику вентилятора в одной точке.

Следовательно, устойчивость вентиляционного режима шахты зависит от типа характеристики вентилятора, характеристики вентиляционной ветви, а экономичность работы вентилятора от места нахождения точки пересечения характеристик вентилятора и вентиляционной ветви на характеристике вентилятора.

Сущность графического способа подбора вентиляторов при параллельной их работе на разных стволах

Проведенное выше исследование характеристик сложных вентиляционных сетей шахт и характеристик шахтных вентиляторов позволяет предложить следующую методику подбора вентиляторов при параллельной их работе на разных стволах.

1. На кальку, в масштабе имеющихся индивидуальных характеристик вентиляторов, наносят координатные оси $h—Q$. В этих осях помечают точку C с координатами h, Q , которые характеризуют требуемый вентиляционный режим. Эти координаты получаются на основании подсчета количества воздуха Q , необходимого для подачи в рассматриваемую вентиляционную ветвь, и давления h , требуемого для перемещения расчетного количества воздуха Q .

2. На оси ординат помечают точку C' пересечения характеристики вентиляционной ветви с осью ординат. Величина C' определяется по формуле (18).

3. Соединяют точки C и C' прямой, которая служит для подбора и анализа работы вентилятора.

4. Полученную кальку накладывают на индивидуальную характеристику вентилятора (рис. 4). Если точка C будет находиться на рабочей части характеристики вентилятора, а прямая $C—C'$ пересекает характеристику вентилятора только в точке C , то это указывает на обеспечение устойчивой и экономичной работы вентилятора. Аналогично подбираются вентиляторы и для других вентиляционных ветвей сложной сети шахты.

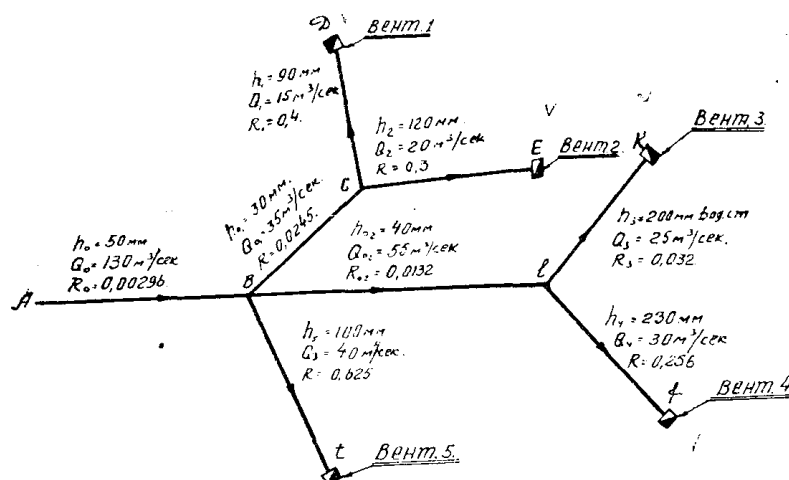


Рис. 6. Принципиальная схема вентиляции шахты и расстановки вентиляторов.

Угол наклона прямой $C—C'$ к горизонтали характеризует изменение степени устойчивости работы вентилятора. Чем острее угол наклона прямой $C—C'$ к горизонтали, тем ниже устойчивость работы вентилятора и наоборот.

Принимая за характеристику вентиляционной ветви прямую $C—C'$, мы тем самым увеличиваем запас устойчивости (рис. 1).

Пример применения предлагаемой методики подбора вентилятора при параллельной их работе на разных стволах. Исходными данными для подбора вентиляторов при параллельной их работе на разных стволах являются:

1. Составление принципиальной схемы вентиляции шахты и расстановки вентиляторов (рис. 6) с указанием сопротивлений R участков вентиляционной сети, количества воздуха Q , проходящего по ним, и депрессии их h .

Принципиальная схема вентиляции шахты и расстановки вентиляторов (рис. 6) представляет вентиляционные струи с максимальной депрессией по направлению к каждому из вентиляторов.

2. Определение расчетных параметров вентиляторных установок (рис. 6), т. е. координат прямых $D-D'$; $E-E'$; $K-K'$; $f-f'$; $t-t'$. Координаты точек D, E, K, f, t определяем по принципиальной схеме вентиляции и расстановки вентиляторов, а координаты точек D', E', K', f', t' — по формуле (18) в соответствии с принципиальной схемой вентиляции шахты и расстановки вентиляторов (рис. 6).

Прямая $D-D'$ для подбора вентилятора 1 имеет следующие координаты $D(Q_D, h_D)$, $D'(Q_{D'}, h_{D'})$,

где $Q_D = Q_1 = 15 \text{ м}^3/\text{сек}$ (рис. 6);

$$h_D = h_0 + h_{01} + h_1 = 50 + 30 + 90 = 170 \text{ мм вод. ст.}$$

$$Q_{D'} = 0;$$

$$h_{D'} = C_{A-D} = R_0 (Q_0 - Q_1)^2 + R_{01} (Q_{01} - Q_1)^2 =$$

$$= 0,00296 (130 - 15)^2 + 0,0245 (35 - 15)^2 =$$

$$= 39,2 + 9,8 = 49 \text{ мм вод. ст.}$$

Аналогично подсчитываем координаты прямых для подбора других вентиляторов и результаты сводим в таблицу 1.

3. Нанесение прямых $D-D'$; $E-E'$; $K-K'$; $f-f'$; $t-t'$ на кальку.

В масштабе имеющихся индивидуальных характеристик на кальку наносим координатные оси $h-Q$ и в этих осях по координатам, сведенным в таблицу 1, строим прямые $D-D'$; $E-E'$; $K-K'$; $f-f'$; $t-t'$ (рис. 7).

Накладывая полученную кальку (рис. 7) на индивидуальные характеристики вентиляторов, подбираем вентиляторы.

Для вентиляционной ветви $A-D$ с $Q = 15 \text{ м}^3/\text{сек}$ и $h = 170 \text{ мм вод. ст.}$ подходит двуступенчатый вентилятор серии B с $D = 1,2 \text{ м}$, при $n = 1500 \text{ об/мин}$ и углом поворота лопаток $\Theta = 18^\circ, \eta = 0,6$ [5,115—119].

Для вентиляционной ветви $A-E$ подходит осевой двухступенчатый вентилятор серии B с $D = 1,2 \text{ м}$, при $n = 1500 \text{ об/мин}$, с углом поворота лопастей $\Theta = 27^\circ, \eta = 0,57$ (рис. 7).

Для вентиляционной ветви $A-K$ подходит такой же вентилятор, но с углом поворота лопастей $\Theta = 38^\circ, \eta = 0,59$, а для ветви $A-f$ с углом поворота лопастей $\Theta = 47^\circ$.

Для вентиляционной ветви $A-t$ подходит осевой одноступенчатый вентилятор серии B с $D = 1,8 \text{ м}$ при $n = 1000 \text{ об/мин}$, с углом поворота лопаток $\Theta = 28^\circ, \eta = 0,61$.

Выводы

Исследование характеристик вентиляционных ветвей и характеристик вентиляторов позволяет установить:

1. Рекомендуемый графический способ подбора вентиляторов при параллельной их работе на разных стволах обеспечивает: простоту и наглядность подбора вентиляторов, вполне достаточную точность для практических целей, доступен любому техническому работнику вентиляции шахты.

Таблица 1

Координаты прямых для подбора вентиляторов

Вентилятор 1	Прямая $D - D'$			
	коор. D		коор. D'	
	Q_D	h_D	$Q_{D'}$	$h_{D'}$
	15	170	0	49
Вентилятор 2	Прямая $E - E'$			
	коор. E		коор. E'	
	Q_E	h_E	$Q_{E'}$	$h_{E'}$
	20	200	0	37
Вентилятор 3	Прямая $K - K'$			
	коор. K		коор. K'	
	Q_K	h_K	$Q_{K'}$	$h_{K'}$
	25	290	0	44,4
Вентилятор 4	Прямая $f - f'$			
	коор. f		коор. f'	
	Q_f	h_f	$Q_{f'}$	$h_{f'}$
	30	320	0	37,8
Вентилятор 5	Прямая $t - t'$			
	коор. t		коор. t'	
	Q_t	h_t	$Q_{t'}$	$h_{t'}$
	40	150	0	24,0

Следовательно, предлагаемый упрощенный графический способ подбора вентиляторов имеет практическое значение.

2. Подбор вентиляторов при параллельной их работе на разных стволах аналогичен подбору одиночно работающих вентиляторов, но при характеристике вентилятора, имеющего только максимум (рис. 4), возникает необходимость проверки устойчивости вентиляционного режима в вентиляционной ветви по выражению $C < h$ при $Q = 0$, а при характеристике вентилятора, имеющего и максимум и минимум (рис. 1, 4), по формуле

$$\frac{h_{A-B} - C_{A-B}}{Q_{A-B}} > \operatorname{tg} \alpha, \quad (19)$$

где h_{A-B} — депрессии вентиляционной ветви $A-B$;

Q_{A-B} — количество воздуха, подаваемое вентилятором в вентиляционную ветвь $A-B$;

C_{A-B} — свободный член уравнения характеристики вентиляционной ветви $A-B$, определяемый по формуле (18);

$\operatorname{tg} \alpha$ — тангенс угла наклона прямой $C-C'$ (рис. 4) подбора вентилятора к горизонтали, когда она пересекает характеристику вентилятора не в одной точке. Поэтому в данном случае лучше применять изложенный, упрощенный графический способ подбора вентиляторов.

3. Подбор осевых вентиляторов с углом поворота лопаток до 20° , при параллельной их работе на разных стволах, аналогичен подбору вентиляторов при одиночной работе.

4. Параллельная работа вентиляторов на разных стволах может быть исключена применением нагнетательно-всасывающего способа, когда воздух по общим путям будет перемещаться за счет депрессии нагнетательного вентилятора, а дальше за счет депрессии всасывающих вентиляторов. В этом случае получается последовательная работа вентиляторов.

5. Величина свободного члена в уравнении характеристик вентиляционных ветвей, обслуживаемых центробежными вентиляторами, является показателем устойчивости их работы, при $C < h$ и при $Q = 0$ будет устойчивый режим работы вентиляторов, если они работают на правой части характеристики, а при $C > h$ и при $Q = 0$ — неустойчивый.

ЛИТЕРАТУРА

1. П а к В. С. Вентиляция шахт параллельно включенными вентиляторами. Углетехиздат, 1947.
2. Воронин В. Н. Шахтные вентиляторные установки. Углетехиздат, 1953.
3. Скочинский А. А., Комаров В. Б. Рудничная вентиляция. Углетехиздат, 1951.
4. Гейер В. Г. и Борисенко К. С. Эксплуатация шахтных вентиляторных установок. ГОНТИ, 1939.
5. Хаджигов Р. Н. Шахтные вентиляторные, насосные и пневматические установки. Углетехиздат, 1951.